

PEMANFAATAN BIOMASSA LIGNOSELULOSA AMPAS TEBU UNTUK PRODUKSI BIOETANOL

Euis Hermiati¹, Djumali Mangunwidjaja², Titi Candra Sunarti², Ono Suparno², dan Bambang Prasetya³

¹UPT BPP Biomaterial – LIPI, Jalan Raya Bogor km 46, Cibinong, Bogor 16911,
Telp. (021) 87914511, Faks. (021) 87914510, E-mail: euis.hermiati@lipi.go.id

²Departemen Teknologi Industri Pertanian, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor, Kampus IPB
Darmaga Kotak Pos 220, Bogor 16002, Telp. dan Faks. (0251) 8621974, E-mail: fateta@fateta-ipb.ac.id

³Pusat Penelitian Bioteknologi – LIPI, Jalan Raya Bogor km 46, Cibinong, Bogor 16911,
Telp. (021) 8754587, Faks. (021) 8754588, E-mail: bambang.prasetya@lipi.go.id

Diajukan: 07 Desember 2009; Diterima: 01 Juli 2010

ABSTRAK

Ampas tebu sebagai limbah pabrik gula merupakan salah satu bahan lignoselulosa yang potensial untuk dikembangkan menjadi sumber energi seperti bioetanol. Konversi bahan lignoselulosa menjadi bioetanol mendapat perhatian penting karena bioetanol dapat digunakan untuk mensubstitusi bahan bakar bensin untuk keperluan transportasi. Bahan lignoselulosa, termasuk dari ampas tebu terdiri atas tiga komponen utama, yaitu selulosa, hemiselulosa, dan lignin. Konversi bahan lignoselulosa menjadi etanol pada dasarnya terdiri atas perlakuan pendahuluan, hidrolisis selulosa menjadi gula, fermentasi gula menjadi etanol, dan pemurnian etanol melalui proses distilasi dan dehidrasi. Biaya produksi etanol masih cukup tinggi. Oleh karena itu, berbagai penelitian dilakukan untuk memperbaiki proses produksi mulai dari tahap perlakuan pendahuluan, hidrolisis selulosa, fermentasi gula menjadi etanol sampai dengan pemurnian etanol. Dengan memerhatikan potensi biomassa lignoselulosa, khususnya ampas tebu sebagai bahan dasar bioetanol, perlu dilakukan pengkajian terhadap hasil-hasil penelitian dalam upaya pemanfaatan bahan tersebut. Potensi perolehan etanol dari ampas tebu yang dihasilkan oleh pabrik gula di Indonesia mencapai 614.827 kL/tahun sehingga berpeluang membantu upaya pemenuhan kebutuhan etanol untuk bahan bakar yang diperkirakan sekitar 1,10 juta kL. Namun demikian, masih cukup banyak hambatan dan kendala untuk produksi dan aplikasi bioetanol dari biomassa lignoselulosa, termasuk dari ampas tebu, terutama penguasaan teknologi konversi biomassa lignoselulosa menjadi etanol dan biaya produksi yang masih tinggi. Diperlukan kebijakan pemerintah agar dapat mendorong pemanfaatan ampas tebu sebagai bahan baku bioetanol, antara lain melalui penelitian dan pengembangan, pemberian insentif bagi pabrik gula yang memanfaatkan ampas tebu untuk bioetanol, dan subsidi harga etanol dari biomassa lignoselulosa.

Kata kunci: Limbah tebu, lignoselulosa, konversi, etanol

ABSTRACT

Utilization of lignocellulosic biomass from sugarcane bagasse for bioethanol production

Sugarcane bagasse is one of potential lignocellulosic biomass for energy through physical, chemical or biological conversion. The material is renewable and abundantly available, especially as wastes or by-products of sugarcane industries. Of many conversion processes, lignocellulosic conversion to ethanol becomes focus of interest recently, since ethanol can be further used as biofuel to substitute gasoline for transportation. Lignocellulosic material, including sugarcane bagasse mainly consists of three components, namely cellulose, hemicellulose, and lignin. The conversion of these materials basically consists of pretreatment, cellulose hydrolysis, sugar fermentation to ethanol, and purification of ethanol. Production cost of this conversion is still high; therefore, many researches have been conducted to improve the conversion process, either pretreatment, hydrolysis, fermentation or purification, so that the cost could be reduced. This paper reviewed literatures on potential and characteristics of lignocellulosic materials, especially sugarcane bagasse, and conversion of these materials to ethanol. There is as much as 614,827 kL/year of ethanol potentially produced from sugarcane bagasse resulted from sugarcane factories in Indonesia. This amount of ethanol would have a great contribution to fulfill 1.10 million tons demand of ethanol. However, there are still some recalcitrans in production and implementation of lignocellulosic bioethanol, especially due to the unproven conversion technology of lignocellulosic biomass to ethanol and the high production cost. Therefore, government policies in supporting research and development, providing special incentives for sugarcane factories that produced ethanol from sugarcane bagasse, and giving subsidy to reduce bioethanol price, are needed.

Keywords: Sugar by products, lignocellulose, conversion, ethanol

Bahan lignoselulosa merupakan biomassa yang berasal dari tanaman dengan komponen utama lignin, selulosa, dan hemiselulosa. Ketersediaannya yang cukup melimpah, terutama sebagai limbah pertanian, perkebunan, dan kehutanan, menjadikan bahan ini berpotensi sebagai salah satu sumber energi melalui proses konversi, baik proses fisika, kimia maupun biologis. Salah satu proses konversi bahan lignoselulosa yang banyak diteliti adalah proses konversi lignoselulosa menjadi etanol yang selanjutnya dapat digunakan untuk mensubstitusi bahan bakar bensin untuk keperluan transportasi.

Ada beberapa faktor yang mendorong makin intensifnya dilakukan penelitian pemanfaatan bahan lignoselulosa menjadi sumber energi, dalam hal ini etanol. Pertama, kebutuhan dan konsumsi energi terus meningkat dari tahun ke tahun, sementara sumber daya alam yang dapat menghasilkan energi makin terkuras karena sebagian besar sumber energi saat ini berasal dari sumber daya alam yang tidak terbarukan, seperti minyak, gas, dan batu bara. Kedua, bioetanol memiliki karakteristik yang lebih baik dibandingkan dengan bensin karena dapat meningkatkan efisiensi pembakaran (Hambali *et al.* 2007) dan mengurangi emisi gas rumah kaca (Costello dan Chum 1998; DiPardo 2000; Kompas 2005; Hambali *et al.* 2007). Ketiga, bahan lignoselulosa tersedia cukup melimpah dan tidak digunakan sebagai bahan pangan sehingga penggunaannya sebagai sumber energi tidak mengganggu pasokan bahan pangan. Di samping itu, etanol juga merupakan bahan kimia yang banyak fungsinya dalam kehidupan sehari-hari.

Penggunaan etanol sebagai bahan bakar terus berkembang. Menurut Licht (2009), pada tahun 1999 produksi bahan bakar etanol mencapai 4.972 juta galon (setara 18.819 juta liter), dan pada tahun 2008 meningkat menjadi 17.524 juta galon (setara 66.328 juta liter). Namun, biaya produksi etanol sebagai sumber energi masih relatif tinggi dibandingkan dengan biaya produksi bahan bakar minyak. Saat ini, biaya produksi etanol dari selulosa diperkirakan antara USD1,15 dan USD1,43 per galon atau per 3,785 liter (DiPardo 2000). Namun, dengan meningkatnya harga minyak bumi yang cukup tinggi akhir-akhir ini diharapkan etanol dapat semakin bersaing dengan bahan bakar minyak.

Penelitian konversi bahan-bahan lignoselulosa menjadi etanol telah banyak dilakukan dalam dua dekade terakhir. Kegiatan ini tampaknya akan dan harus terus berlanjut dalam upaya mencari alternatif bahan bakar pengganti minyak bumi yang semakin menipis ketersediaannya.

Berdasarkan prakiraan kebutuhan gasohol untuk kendaraan bermotor di Indonesia pada tahun 2010 yang mencapai 200.000 kL, dan pada tahun 2015 dan 2020 masing-masing 600.000 dan 1,10 juta kL (Kompas 2005), produksi etanol dari biomassa atau bioetanol perlu terus ditingkatkan. Selama ini, biomassa yang digunakan juga merupakan bahan pangan, seperti jagung, ubi kayu, dan molasse. Oleh karena itu, penggunaan bahan baku yang jauh lebih murah dan tersedia melimpah, yakni bahan lignoselulosa dari limbah industri pertanian dan kehutanan perlu terus dikembangkan, misalnya ampas tebu sebagai hasil samping pada pabrik gula.

Senyawa lignoselulosa terdiri atas tiga komponen utama, yaitu selulosa, hemiselulosa, dan lignin yang merupakan bahan utama penyusun dinding sel tumbuhan. Konversi bahan lignoselulosa menjadi etanol pada dasarnya terdiri atas tiga tahap, yaitu perlakuan pendahuluan, sakarifikasi, dan fermentasi. Untuk memperoleh *fuel-grade ethanol*, dilakukan pemurnian yang terdiri atas distilasi dan dehidrasi.

Dengan mengamati potensi biomassa lignoselulosa, khususnya ampas tebu sebagai bahan dasar bioetanol, perlu dilakukan pengkajian terhadap berbagai upaya yang telah dilakukan para peneliti untuk memanfaatkan bahan tersebut. Tulisan ini mengkaji pemanfaatan biomassa lignoselulosa dari ampas tebu untuk bioetanol. Pokok bahasan difokuskan pada karakteristik dan potensi biomassa lignoselulosa, teknologi konversi biomassa menjadi etanol, dan potensi pengembangannya.

KARAKTERISTIK DAN POTENSI BIOMASSA LIGNOSELULOSA

Komponen utama dalam bahan lignoselulosa adalah selulosa, hemiselulosa, dan lignin. Ketiganya membentuk suatu ikatan kimia yang kompleks yang menjadi bahan dasar dinding sel tumbuhan.

Selulosa merupakan polimer linier glukosa dengan struktur rantai yang beragam. Unit-unit glukosa terikat dengan ikatan glikosidik β -(1 \rightarrow 4). Dua unit glukosa yang berdekatan bersatu dengan mengeliminasi satu molekul air di antara gugus hidroksil pada karbon 1 dan karbon 4. Kedudukan β dari gugus -OH pada C1 membutuhkan pemutaran unit glukosa berikutnya melalui sumbu C1-C4 cincin piranosa. Unit ulang terkecil dari rantai selulosa adalah unit selobiosa dengan panjang 1,03 nm dan terdiri atas dua unit glukosa.

Hemiselulosa merupakan istilah umum bagi polisakarida yang larut dalam alkali. Hemiselulosa sangat dekat asosiasinya dengan selulosa dalam dinding sel tanaman (Fengel dan Wegener 1984; Howard *et al.* 2003). Lima gula netral, yaitu glukosa, mannososa, dan galaktosa (heksosan) serta xilosa dan arabinosa (pentosan) merupakan konstituen utama hemiselulosa (Fengel dan Wegener 1984). Berbeda dari selulosa yang merupakan homopolisakarida dengan monomer glukosa dan derajat polimerisasi yang tinggi (10.000–14.000 unit), rantai utama hemiselulosa dapat terdiri atas hanya satu jenis monomer (homopolimer), seperti xilan, atau terdiri atas dua jenis atau lebih monomer (heteropolimer), seperti glukomannan. Rantai molekul hemiselulosa pun lebih pendek daripada selulosa.

Lignin mempunyai struktur molekul yang sangat berbeda dengan polisakarida karena terdiri atas sistem aromatik yang tersusun atas unit-unit fenil propana. Kandungan lignin dalam kayu daun jarum lebih tinggi daripada dalam kayu daun lebar. Di samping itu, terdapat beberapa perbedaan struktur lignin dalam kayu daun jarum dan dalam kayu daun lebar (Fengel dan Wegener 1984).

Fujita dan Harada (1991) menjelaskan selulosa, hemiselulosa, dan lignin yang berada dalam kayu yang merupakan salah satu bahan lignoselulosa. Selulosa adalah senyawa kerangka yang menyusun 40–50% bagian kayu dalam bentuk selulosa mikrofibril, di mana hemiselulosa adalah senyawa matriks yang berada di antara mikrofibril-mikrofibril selulosa. Lignin, di lain pihak, adalah senyawa yang keras yang menyelimuti dan mengeraskan dinding sel. Peran ketiga komponen kimia ini dalam dinding sel dapat dianalogkan seperti bahan konstruksi yang terbuat dari *reinforced concrete*, di mana selulosa, lignin, dan hemiselulosa berperan sebagai

rangka besi, semen, dan bahan penguat yang memperbaiki ikatan di antara mereka.

Kandungan ketiga senyawa utama dalam bahan lignoselulosa berbeda-beda, bergantung pada sumbernya. Tabel 1 menunjukkan kandungan selulosa, hemiselulosa, dan lignin pada beberapa biomassa limbah pertanian dan hasil hutan, sedangkan Tabel 2 menyajikan kandungan karbohidrat pada beberapa limbah biomassa. Dengan mengetahui kandungan karbohidrat yang terdapat dalam bahan lignoselulosa, dapat diperkirakan berapa banyak etanol yang dapat dihasilkan dari bahan tersebut dengan asumsi semua komponen karbohidrat tersebut dapat dikonversi secara sempurna menjadi etanol. Dari data jumlah karbohidrat yang ada juga dapat dihitung atau dinilai seberapa besar efektivitas proses konversi yang dilakukan.

Indonesia memiliki banyak pabrik gula tebu, baik yang dikelola oleh negara (PT Perkebunan Nusantara/PTPN) maupun swasta. Data statistik dari Direktorat Jenderal Perkebunan, Kementerian Pertanian menunjukkan bahwa produksi gula meningkat dari tahun ke tahun (Tabel 3). Direktorat Jenderal Perkebunan (2009b) juga melaporkan bahwa produksi tebu nasional adalah 33 juta ton/tahun dan saat ini terdapat 58 pabrik gula dengan kapasitas giling total 195.622 ton tebu per hari (TTH). Sementara itu, data P3GI (2010) menunjukkan terdapat 15 perusahaan dengan 62 pabrik gula dengan jumlah tebu yang digiling 29,911 juta ton.

Tabel 4 menyajikan potensi etanol yang dapat dihasilkan pabrik gula di Indonesia berdasarkan data produksi giling tahun 2009 yang diperoleh dari P3GI (2010) dan dihitung mengikuti Badger (2002) dengan asumsi ampas tebu kering 10% dari tebu digiling, kadar selulosa (glukan) dan hemiselulosa (xilan) ampas tebu masing-masing 40% dan 20%, efisiensi sakarifikasi glukan dan xilan masing-masing 76% dan 90%, serta efisiensi fermentasi glukosa dan xilosa masing-masing 75% dan 50%. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa potensi etanol yang dapat dihasilkan berkisar 467–112.552 kL/tahun, dan potensi total untuk seluruh Indonesia 614.827 kL/tahun.

Untuk mencapai target swasembada gula, Direktorat Jenderal Perkebunan menargetkan pembangunan delapan

Tabel 1. Kandungan selulosa, hemiselulosa, dan lignin pada beberapa limbah pertanian dan hasil hutan.

Jenis limbah	Selulosa (%)	Hemiselulosa (%)	Lignin (%)
Batang kayu daun lebar ¹	40–55	24–40	18–25
Batang kayu daun jarum ¹	45–50	25–35	25–35
Daun ¹	15–20	80–85	0
Tongkol jagung ¹	45	35	15
Kulit kacang ¹	25–30	25–30	30–40
Jerami gandum ¹	30	50	15
Ampas tebu ²	50	25	25
Tandan kosong kelapa sawit ³	41,30–46,50	25,30–33,80	27,60–32,50

Sumber: ¹Reshamwala *et al.* (1995), Cheung dan Anderson (1997), Boopathy (1998), Dewes dan Hunsche (1998) dalam Sun dan Cheng (2002); ²Pandey *et al.* (2000); ³Syafwina *et al.* (2002a).

Tabel 2. Kandungan karbohidrat pada beberapa limbah biomassa (persentase berdasarkan berat kering oven bahan).

Jenis limbah	Glukan (%)	Xilan (%)	Mannan (%)	Arabinan (%)
Kayu (<i>Pinus radiata</i>)	47,1	3,2	9,7	0,1
Tongkol jagung	35,8	20,8	1,7	14,4
Kulit kedelai	34,2	7,5	2,0	3,2
Jerami gandum	36,5	18,4	0,0	2,2
Ampas tebu	42,7	21,0	-	0,6
Tandan kosong kelapa sawit	31,0	17,3	-	0,5

Sumber: Hayn *et al.* (1993).

Tabel 3. Produksi gula di Indonesia tahun 2001–2009 menurut pengusaha.

Tahun	Produksi gula hablur (t)			
	PR	PBN	PBS	Total
2001	813.538	310.949	600.980	1.725.467
2002	967.160	297.685	490.509	1.755.354
2003	839.028	370.476	422.414	1.631.918
2004	1.028.681	383.892	639.071	2.051.644
2005	1.193.653	423.421	624.668	2.241.742
2006 ¹	1.208.365	431.485	626.962	2.266.812
2007 ²	1.232.542	431.952	632.521	2.297.015
2008 ²	1.253.455	432.012	641.752	2.327.219
2009 ²	1.271.670	432.168	653.584	2.357.422

PR = Perkebunan Rakyat, PBN = Perkebunan Besar Nasional,

PBS = Perkebunan Besar Swasta.

¹Angka sementara.

²Angka estimasi untuk gula hablur dengan model *double exponential smoothing*.

Sumber: Direktorat Jenderal Perkebunan (2009a).

pabrik gula baru di Merauke, Sulawesi Tenggara, Sumatera Selatan, Garut, dan Jawa Timur dengan kapasitas masing-masing 8.000 TTH dan diproyeksikan mulai berproduksi pada tahun 2014 (Direktorat Jenderal Perkebunan 2009b). Dengan demikian, potensi etanol yang dapat dihasilkan dari ampas tebu juga akan meningkat.

TEKNOLOGI KONVERSI BIOMASSA LIGNOSELULOSA MENJADI ETANOL

Proses konversi bahan lignoselulosa menjadi etanol terdiri atas tiga tahap, yaitu perlakuan pendahuluan, sakarifikasi atau hidrolisis selulosa menjadi gula-gula sederhana, dan fermentasi gula-gula

Tabel 4. Potensi perolehan etanol dari pabrik gula di Indonesia¹.

Nama perusahaan dan jumlah pabrik gula (PG)	Tebu digiling (t)	Ampas tebu (t)	Selulosa (glukan) (t)	Hemiselulosa (xilan) (t)	Glukosa (t)	Xilosa (t)	Potensi perolehan etanol (kL)		
							Dari glukan	Dari xilan	Total
PTPN II (2 PG)	514.067,08	51.407	20.563	10.281	15.628	9.253	7.576	2.991	10.567
PTPN VII (2 PG)	1.681.454,00	168.145	67.258	33.629	51.116	30.266	24.781	9.782	34.563
PTPN IX (8 PG)	2.007.350,40	200.735	80.294	40.147	61.023	36.132	29.584	11.678	41.261
PTPN X (11 PG)	5.475.602,20	547.560	219.024	109.512	166.458	98.561	80.697	31.854	112.552
PTPN XI (17 PG)	5.246.756,00	524.676	209.870	104.935	159.501	94.442	77.325	30.523	107.848
PTPN XIV (3 PG)	367.960,30	36.796	14.718	7.359	11.186	6.623	5.423	2.141	7.563
PT PG Rajawali I (4 PG)	3.233.137,30	323.314	129.325	64.663	98.287	58.196	47.649	18.809	66.458
PT PG Rajawali II (5 PG)	1.354.320,50	135.432	54.173	27.086	41.171	24.378	19.959	7.879	27.838
PT Sugar Groups (3 PG)	4.952.572,94	495.257	198.103	99.051	150.558	89.146	72.989	28.812	101.801
PT Kebon Agung (2 PG)	1.970.477,90	197.048	78.819	39.410	59.903	35.469	29.040	11.463	40.503
PT Gn. Madu Plantations (1 PG)	2.329.264,67	232.926	93.171	46.585	70.810	41.927	34.328	13.550	47.878
PT PG PSMI (1 PG)	62.750,00	6.275	2.510	1.255	1.908	1.130	925	365	1.290
PT PG Gorontalo (1 PG)	571.292,00	57.129	22.852	11.426	17.367	10.283	8.419	3.323	11.743
PT IGN (1 PG)	22.696,00	2.270	908	454	690	409	334	132	467
PT Pakis Baru (1 PG)	121.447,60	12.145	4.858	2.429	3.692	2.186	1.790	707	2.496
Indonesia	29.911.148,89	2.991.114	1.196.445	598.222	909.298	538.402	440.819	174.007	614.827

¹Berdasarkan data produksi giling tahun 2009 (P3GI 2010) dan perhitungan perolehan etanol menurut Badger (2002).

sederhana menjadi etanol. Selanjutnya, dilakukan pemurnian etanol melalui distilasi dan dehidrasi untuk memperoleh *fuel-grade ethanol*.

Dalam proses konversi bahan ligno-selulosa menjadi etanol, dapat dilakukan beberapa integrasi reaksi seperti yang disajikan pada Gambar 1. Reaksi yang diintegrasikan antara lain adalah reaksi sakarifikasi atau hidrolisis selulosa menjadi gula dan reaksi fermentasi gula heksosa menjadi etanol atau yang biasa dikenal dengan proses sakarifikasi dan fermentasi serentak (*simultaneous saccharification and fermentation/SSF*). Reaksi-reaksi lain yang dapat diintegrasikan adalah fermentasi heksosa dan pentosa yang disebut *co-fermentation* (CF), reaksi sakarifikasi, fermentasi heksosa dan pentosa yang disebut *simultaneous saccharification and co-fermentation* (SSCF) serta reaksi SSCF ditambah dengan produksi selulase yang disebut *consolidated bioprocessing* (CBP). Di antara keempat proses integrasi reaksi tersebut, proses SSF adalah yang paling banyak dilakukan.

Perlakuan Pendahuluan

Perlakuan pendahuluan bertujuan untuk menghilangkan lignin, mengurangi kristalinitas selulosa, dan meningkatkan

porositas bahan. Perlakuan pendahuluan dinilai sebagai salah satu tahap yang paling mahal dalam proses konversi biomassa selulosa menjadi gula, yaitu mencapai USD0,30/galon (Rp660/l) etanol yang dihasilkan (Mosier *et al.* 2005). Proses ini juga sangat berpengaruh terhadap biaya yang harus dikeluarkan pada proses selanjutnya, misalnya penggunaan enzim pada proses sakarifikasi. Proses perlakuan pendahuluan yang baik adalah yang dapat mengurangi penggunaan enzim yang harganya mahal (Wyman *et al.* 2005). Oleh karena itu, Cardona dan Sanchez (2007) menyatakan tahap tersebut merupakan tantangan utama pada konversi biomassa lignoselulosa menjadi etanol.

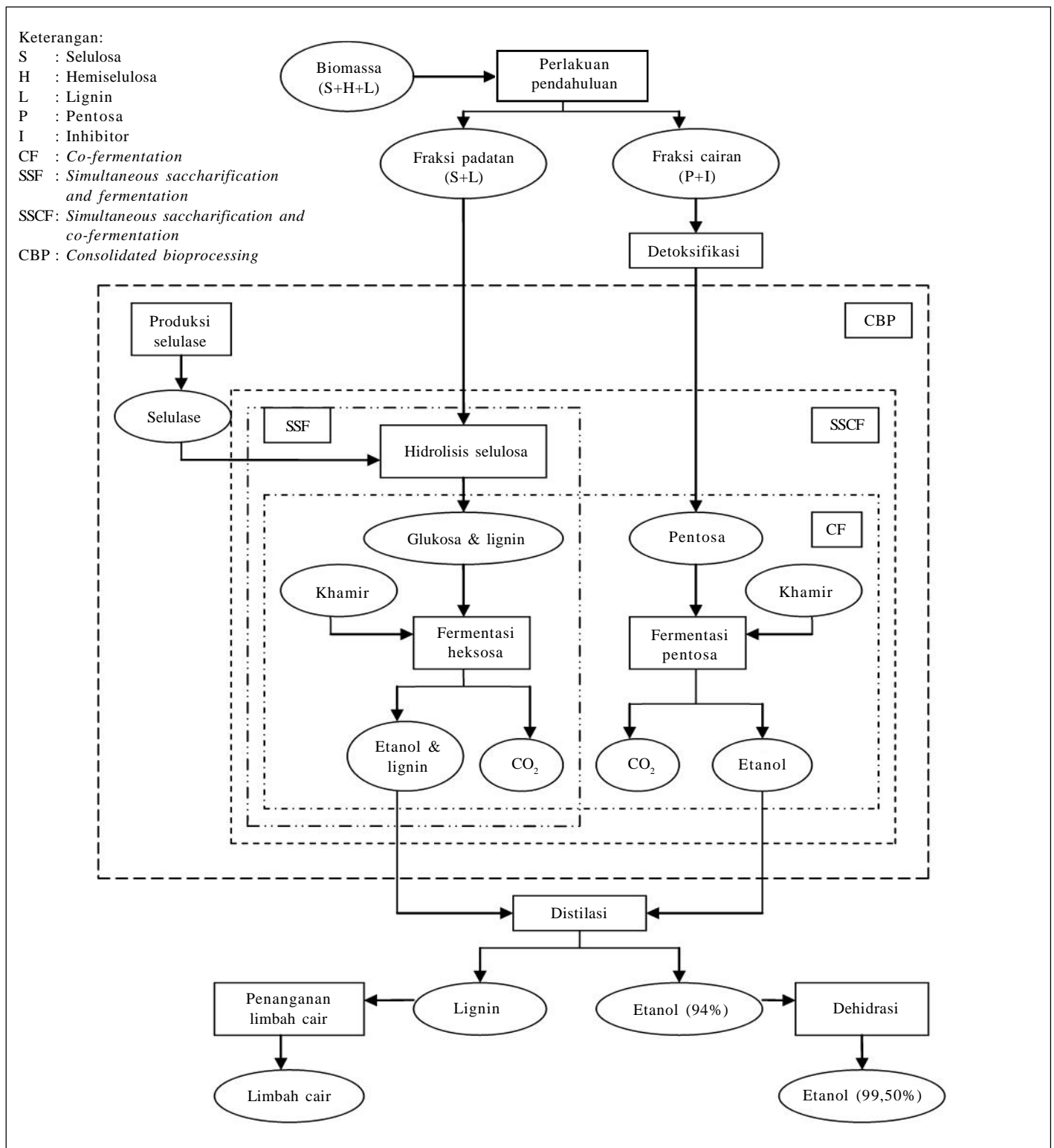
Perlakuan pendahuluan dapat dilakukan secara fisika, fisiko-kimia, kimia, biologis maupun kombinasi dari cara-cara tersebut (Sun dan Cheng 2002).

- 1) Perlakuan pendahuluan secara fisika antara lain berupa pencacahan secara mekanik, penggilingan, dan peneupangan untuk memperkecil ukuran bahan dan mengurangi kristalinitas selulosa.
- 2) Perlakuan pendahuluan secara fisiko-kimia antara lain adalah *steam explosion*, *ammonia fiber explosion* (AFEX), dan *CO₂ explosion*. Pada metode ini, partikel biomassa dipa-

parkan pada suhu dan tekanan tinggi, kemudian tekanannya diturunkan secara cepat sehingga bahan mengalami dekompresi eksplosif.

- 3) Perlakuan pendahuluan secara kimia, di antaranya adalah ozonolisis, hidrolisis asam, hidrolisis alkali, delignifikasi oksidatif, dan proses organosolv.
- 4) Perlakuan secara biologis. Pada metode ini, digunakan mikroorganisme jamur pelapuk coklat, jamur pelapuk putih, dan jamur pelunak untuk mendegradasi lignin dan hemiselulosa yang ada dalam bahan lignoselulosa. Di antara ketiga jamur tersebut, yang paling efektif untuk perlakuan pendahuluan pada bahan lignoselulosa adalah jamur pelapuk putih (*white-rot fungi*).

Dibandingkan dengan bahan ligno-selulosa lain yang banyak tersedia sebagai hasil samping industri pertanian dan perkebunan, misalnya jerami padi dan tandan kosong kelapa sawit, ampas tebu memiliki kelebihan, terutama dalam hal bentuk dan ukuran bahan. Ampas tebu dari pabrik gula sudah merupakan partikel kecil yang tidak lagi memerlukan proses perlakuan pendahuluan secara fisika berupa pencacahan atau penggilingan untuk memperkecil ukuran bahan. Ampas tebu dapat langsung diberi perlakuan pendahuluan lanjutan untuk mendegradasi lignin



Gambar 1. Diagram alir proses konversi bahan lignoselulosa menjadi etanol (Cardona dan Sanchez 2007).

dalam bahan. Penelitian perlakuan pendahuluan terhadap ampas tebu antara lain dilakukan oleh Kaar *et al.* (1998) menggunakan *steam explosion*, Laser *et al.* (2002) menggunakan proses *liquid hot water* (LHW), dan uap panas, Sasaki *et al.* (2003) menggunakan proses hidro-

termal, serta Samsuri *et al.* (2004, 2005) dan Anita *et al.* (2009) dengan menggunakan jamur pelapuk putih.

Perlakuan pendahuluan biomassa lignoselulosa yang sudah mapan untuk mendegradasi lignin adalah penggunaan larutan asam encer, sedangkan metode

perlakuan pendahuluan lainnya seperti *steam explosion* dan LHW masih dalam taraf pilot atau laboratorium (Hamelinck *et al.* 2005). Penelitian penggunaan proses fisik seperti uap bertekanan tinggi, *steam explosion*, dan hidrotermal pada perlakuan pendahuluan biomassa lignoselulosa

telah dilaporkan oleh beberapa peneliti (Kaar *et al.* 1998; Laser *et al.* 2002; Sasaki *et al.* 2003; Palmarola-Adrados *et al.* 2005; Suryawati *et al.* 2009) dengan hasil yang baik atau cukup menjanjikan. Kajian tekno-ekonomi yang dilakukan oleh Hamelinck *et al.* (2005) menyimpulkan bahwa perlakuan pendahuluan dengan metode *steam explosion* menjanjikan, namun memerlukan pengembangan lebih lanjut sebelum dapat menjamin diperolehnya hasil konversi yang cukup. Menurut Hahn-Hagerdal *et al.* (2006), proses perlakuan pendahuluan menggunakan *steam explosion* dan penambahan katalis seperti SO₂ adalah yang paling mendekati tahap komersialisasi. Proses ini telah banyak diuji pada skala pilot, misalnya pada *pilot plant* Iogen di Kanada, Souston di Perancis, dan Ornskoldsvik di Swedia, dan akan digunakan pada *pilot plant* Salamanca di Spanyol.

Walaupun sudah dalam tahap komersialisasi, perlakuan pendahuluan menggunakan larutan asam kuat encer memiliki kelemahan karena berpotensi menghasilkan produk samping seperti furfural dan hidroksi metil furfural (HMF) yang dapat menghambat proses fermentasi, mencemari lingkungan, misalnya menghasilkan residu berupa gipsum, selain memerlukan alat-alat proses yang terbuat dari bahan yang tahan terhadap kondisi asam dan suhu tinggi. Produk samping yang menghambat proses fermentasi dapat dikurangi dengan penggunaan suhu yang moderat (121°C) atau diatasi dengan pemberian kalsium hidroksida atau detoksifikasi, tetapi cara ini memerlukan biaya tambahan (Saha *et al.* 2005).

Teknologi iradiasi gelombang mikro juga telah dicoba digunakan dalam perlakuan pendahuluan bahan lignoselulosa (Ooshima *et al.* 1984; Magara *et al.* 1989; Kitchaiya *et al.* 2003; Hu dan Wen 2008; Keshwani 2009). Semua penelitian yang dilakukan menunjukkan bahwa teknologi iradiasi gelombang mikro mempunyai prospek yang cukup baik untuk dikembangkan. Walaupun suhu yang digunakan cukup tinggi, waktu yang digunakan dapat sangat singkat.

Penelitian perlakuan pendahuluan secara biologis antara lain dilaporkan Syafwina *et al.* (2002a, 2002b), Itoh *et al.* (2003), Syafwina *et al.* (2004), Samsuri *et al.* (2004), Tanabe *et al.* (2004), Hatakeyama dan Kuwahara (2004), serta Samsuri *et al.* (2005). Hampir semua penelitian menggunakan jamur pelapuk putih, ter-

utama *Ceriporiopsis subvermispora* yang dikombinasikan dengan perlakuan uap dengan suhu tinggi (180°C) atau dengan perlakuan etanolisis, yaitu penggunaan etanol pada suhu tinggi (140–200°C). Penelitian lain menggunakan jamur pelapuk putih *Trametes versicolor*, *Pleurotus ostreatus*, *Schizophyllum commune*, *Pycnoporus sanguineus*, *Ceriporia lacerata*, *Stereum hirsutum*, *Polyporus brumalis*, dan *Lentinus edodes* (Ermawar *et al.* 2006; Lee 2007; Samsuri *et al.* 2007; Anita *et al.* 2009). Penelitian produksi dan aktivitas enzim pendegradasi lignin yang berasal dari jamur pelapuk putih pada berbagai substrat lignoselulosa antara lain dilakukan oleh Lobos *et al.* (2001), Wuyep *et al.* (2003), dan Elisashvili *et al.* (2008). Beberapa paten yang berkaitan dengan perlakuan pendahuluan biomassa lignoselulosa antara lain menggunakan larutan alkali (Holtzapple *et al.* 2004), ekstruder (Litzen *et al.* 2006), atau enzim (Thompson *et al.* 2007).

Karena beragamnya bahan lignoselulosa, penelitian proses perlakuan pendahuluan yang optimal terhadap bahan ini masih terbuka lebar. Bahan baku yang berbeda akan memerlukan perlakuan pendahuluan yang berbeda pula. Oleh karena itu, tidak ada satu metode umum yang berlaku untuk perlakuan pendahuluan semua bahan lignoselulosa.

Sakarifikasi

Pada tahap sakarifikasi, selulosa diubah menjadi selobiosa dan selanjutnya menjadi gula-gula sederhana seperti glukosa. Hidrolisis selulosa dapat dilakukan menggunakan larutan asam atau secara enzimatis, masing-masing dengan kelebihan dan kekurangannya.

Proses hidrolisis secara enzimatis biasanya berlangsung pada kondisi yang ringan (pH sekitar 4,80 dan suhu 45–50°C) dan tidak menimbulkan masalah korosi. Kelemahannya adalah harga enzim cukup mahal. Komponen biaya enzim dapat mencapai 53–65% dari biaya bahan kimia, dan biaya bahan kimia sekitar 30% dari biaya total.

Enzim selulase biasanya merupakan campuran dari beberapa enzim, sedikitnya ada tiga kelompok enzim yang terlibat dalam proses hidrolisis selulosa, yaitu 1) endoglukanase yang bekerja pada wilayah serat selulosa yang mempunyai kristalinitas rendah untuk memecah selulosa

secara acak dan membentuk ujung rantai yang bebas, 2) eksoglukanase atau selobiohidrolase yang mendegradasi lebih lanjut molekul tersebut dengan memin-dahkan unit-unit selobiosa dari ujung-ujung rantai yang bebas, dan 3) β -glukosidase yang menghidrolisis selobiosa menjadi glukosa. Jumlah enzim yang diperlukan untuk hidrolisis selulosa berbeda-beda, bergantung pada kadar padatan tidak larut air (*water insoluble solids*) pada bahan yang akan dihidrolisis. Sampai tahap tertentu, semakin banyak selulase yang digunakan, semakin tinggi rendemen dan kecepatan hidrolisis, namun juga meningkatkan biaya proses. Hidrolisis selulosa juga dapat dilakukan dengan menggunakan mikroba yang menghasilkan enzim selulase, seperti *Trichoderma reesei*, *Trichoderma viride*, dan *Aspergillus niger*.

Proses hidrolisis selulosa menggunakan asam encer dilakukan pada suhu dan tekanan tinggi dalam waktu yang singkat, beberapa detik sampai beberapa menit, sehingga memungkinkan untuk dilakukan secara kontinu. Proses hidrolisis selulosa menggunakan asam pekat dilakukan pada suhu yang relatif rendah dan tekanan yang diperlukan hanyalah untuk memompa bahan dari satu alat ke alat lain (Demirbas 2005). Waktu reaksi hidrolisis biasanya lebih lama dibanding waktu reaksi menggunakan asam encer. Selanjutnya dijelaskan bahwa metode ini pada umumnya menggunakan asam sulfat pekat yang diikuti pengenceran menggunakan air untuk melarutkan dan menghidrolisis substrat menjadi gula.

Berbeda dengan sakarifikasi menggunakan enzim yang bersifat spesifik, proses sakarifikasi menggunakan asam bersifat tidak spesifik. Selain glukosa, sakarifikasi dengan asam dapat menghasilkan produk samping seperti senyawa furan, fenolik, dan asam asetat (Chandel *et al.* 2007). Produk samping tersebut apabila tidak dihilangkan dapat menghambat proses selanjutnya, yakni fermentasi. Sakarifikasi menggunakan asam juga dapat memicu degradasi glukosa sehingga rendemen glukosa dan etanol menurun (Howard *et al.* 2003). Oleh karena itu, proses menggunakan enzim biasanya lebih disukai daripada proses menggunakan asam karena enzim bekerja lebih spesifik sehingga tidak menghasilkan produk yang tidak diharapkan, dapat digunakan pada kondisi proses yang lebih ringan, dan lebih ramah lingkungan.

Komponen hemiselulosa pada bahan lignoselulosa dapat pula dihidrolisis dan selanjutnya difermentasi untuk menghasilkan etanol. Hidrolisis hemiselulosa dapat menggunakan enzim yang menyerang hemiselulosa, seperti glukuronidase, asetil esterase, xilanase, β -xilidase, galaktomannanase, dan glukomannanase (Duff dan Murray 1996). Beberapa mikroba dapat menghasilkan enzim tersebut, misalnya jamur *Trichoderma* spp. dan *Aspergillus niger*, bakteri *Bacillus* spp. dan *Streptomyces* spp. penghasil xilanase, jamur *Thielavia terrestris* dan *Polyporus versicolor*, bakteri *Bacillus*, *Aeromonas hydrophila*, *Streptomyces* sp., dan *Pseudomonas* sp. penghasil mannanase (Viikari *et al.* 1993).

Beberapa peneliti melaporkan penggunaan beberapa enzim sekaligus untuk proses sakarifikasi, antara lain selulase dan selobiase (β -glukosidase) (Krishna dan Chowdary 2000; Sun dan Cheng 2005; Ohgren *et al.* 2007a), selulase, β -glukosidase, dan xilanase (Ohgren *et al.* 2007b), serta selulase, pektinase, laccase, dan lipase (Saha *et al.* 2005). Enzim β -glukosidase ditambahkan karena aktivitas pemecahan selobiosa oleh selulase tidak memadai. Penambahan β -glukosidase akan mempercepat kerja selulase karena selobiosa yang terbentuk langsung dikonversi menjadi glukosa oleh β -glukosidase. Penambahan xilanase ke dalam substrat tongkol jagung menghasilkan rendemen glukosa mendekati 100% dari rendemen yang dapat dihasilkan secara teoritis. Hal ini diduga karena xilanase menghidrolisis hemiselulosa yang masih berada bersama selulosa setelah perlakuan pendahuluan sehingga meningkatkan aksesibilitas selulosa terhadap selulase (Ohgren *et al.* 2007b).

Fermentasi

Teknologi dan peralatan yang diperlukan untuk proses fermentasi gula dari selulosa pada prinsipnya sama dengan yang digunakan pada fermentasi gula dari pati atau nira yang tersedia secara komersial. Pada proses ini, gula-gula sederhana yang terbentuk difermentasi menjadi etanol dengan bantuan khamir seperti *Saccharomyces cerevisiae* dan bakteri *Zymomonas mobilis*. Fermentasi biasanya dilakukan pada suhu 30°C, pH 5, dan sedikit aerobik. Pada proses fermentasi glukosa, satu molekul glukosa meng-

hasilkan dua molekul etanol dan dua molekul karbon dioksida (CO₂). Fermentasi hasil hidrolisis komponen hemiselulosa seperti xilosa menjadi etanol dapat menggunakan khamir *Pichia stipitis* atau *Candida shehatae* (Hahn-Hagerdal *et al.* 1993). Pada fermentasi xilosa, tiga molekul xilosa menghasilkan lima molekul etanol, lima molekul CO₂, dan lima molekul air (Mc. Millan 1993). Fermentasi pentosa yang berasal dari hemiselulosa dilakukan pada reaktor terpisah karena mikroba yang menggunakan pentosa bekerja lebih lambat dalam mengubah heksosa dan pentosa menjadi etanol dibanding mikroba yang hanya mengubah heksosa menjadi etanol, serta bersifat lebih sensitif terhadap senyawa inhibitor dan produk etanol (Cardona dan Sanchez 2007).

Etanol dan CO₂ yang terbentuk dapat menghambat proses fermentasi, atau biasa dikenal dengan *end-product inhibition*. Selain itu, sel hidup khamir hanya toleran terhadap etanol pada konsentrasi tertentu. Pada media di mana khamir bekerja mengubah gula menjadi etanol, jika konsentrasi etanol mencapai 12%, sel khamir akan mati dan proses fermentasi berhenti. Beberapa cara dapat dilakukan untuk mengatasi masalah tersebut, antara lain dengan mendaur ulang khamir yang terdapat dalam aliran produk untuk meningkatkan densitas sel dalam reaktor, atau dengan menggunakan teknologi fermentasi kontinu (Gregg dan Saddler 1995). Dengan cara ini, produk yang terbentuk segera dipindahkan dari reaktor dan dalam waktu yang bersamaan memasok substrat. Karbon dioksida yang dihasilkan dikeluarkan dan ditangkap dengan *gas scrubber*. Karbon dioksida dapat diolah dan dijual, misalnya dimurnikan untuk digunakan sebagai bahan baku minuman berkarbonat.

Sakarifikasi dan Fermentasi Serentak

Pada proses SSF, hidrolisis selulosa dan fermentasi gula tidak dilakukan secara terpisah atau bertahap, tetapi secara simultan. Mikroba yang digunakan pada proses SSF biasanya adalah jamur penghasil enzim selulase, seperti *T. reesei*, *T. viride*, dan khamir *S. cerevisiae*. Suhu optimal proses SSF adalah 38°C, yang merupakan perpaduan suhu optimal hidrolisis (45–50°C) dan suhu optimal fermentasi (30°C) (Philippidis 1996 dalam

Sun dan Cheng 2002). Konsentrasi substrat biasanya sekitar 10% (padatan tidak larut air), dosis enzim 10–20 FPU/g selulosa, dan konsentrasi khamir 1,50–3 g/L. Proses tersebut dilakukan selama 72 jam.

Proses SSF memiliki keunggulan dibandingkan dengan proses hidrolisis dan fermentasi bertahap. Beberapa keunggulan tersebut adalah: 1) meningkatkan kecepatan hidrolisis dengan mengonversi gula yang terbentuk dari hasil hidrolisis selulosa yang menghambat aktivitas enzim selulase, 2) mengurangi kebutuhan enzim, 3) meningkatkan rendemen produk, 4) mengurangi kebutuhan kondisi steril karena glukosa langsung dikonversi menjadi etanol, 5) waktu proses lebih pendek, dan 6) volume reaktor lebih kecil karena hanya digunakan satu reaktor (Sun dan Cheng 2002).

Ohgren *et al.* (2007a) melaporkan bahwa proses SSF lebih toleran terhadap senyawa inhibitor yang terbentuk atau yang berasal dari proses perlakuan pendahuluan, yang biasanya terdapat dalam fraksi cairan. Inhibitor yang terbentuk, misalnya asam asetat, berpengaruh negatif terhadap hidrolisis enzimatis. Pengaruh negatif ini menurun jika digunakan SSF. Oleh karena itu, pada proses SSF, bahan hasil perlakuan pendahuluan dapat langsung diproses tanpa harus memisahkan dulu fraksi cairan dari fraksi padatan. Beberapa kendala yang perlu diatasi pada proses SSF adalah: 1) suhu hidrolisis dan fermentasi yang tidak sama, 2) toleransi mikroba terhadap etanol, 3) penghambatan kerja enzim oleh etanol (Sun dan Cheng 2002), dan 4) kesulitan memisahkan sel khamir dari sisa lignin dan serat yang dapat mengakibatkan kebutuhan khamir meningkat sehingga menurunkan produksi etanol (Nguyen 1993).

POTENSI PENGEMBANGAN

Proses atau teknologi konversi biomassa menjadi etanol atau bioetanol sudah cukup mapan untuk biomassa penghasil karbohidrat jenis pati atau sukrosa, seperti ubi kayu, jagung, molasse, dan gula tebu. Untuk biomassa lignoselulosa, masalahnya agak berbeda karena dalam bahan lignoselulosa terdapat lignin yang terlebih dulu harus dipisahkan dari selulosa dan hemiselulosa. Selain itu, selulosa merupakan senyawa yang mempunyai bagian yang berstruktur kristal yang agak sulit

didegradasi oleh mikroba atau enzim selulase.

Pada dasarnya, penelitian yang sudah dan perlu dikembangkan berkaitan dengan konversi bahan lignoselulosa menjadi etanol melalui proses SSF dapat dikelompokkan menjadi empat, yaitu: 1) seleksi bahan lignoselulosa dan perlakuan pendahulunya, 2) seleksi dan pengembangan mikroba atau enzim untuk proses hidrolisis, 3) seleksi dan pengembangan mikroorganisme untuk proses fermentasi, dan 4) adaptasi atau pengembangan teknik analisis untuk memantau manfaat SSF (Grohmann 1993).

Salah satu faktor penting dalam seleksi bahan lignoselulosa untuk dikonversi menjadi etanol adalah rasio selulosa terhadap lignin. Untuk memperoleh rendemen yang tinggi, kandungan selulosa dan hemiselulosa harus tinggi, sebaliknya kandungan lignin harus rendah (Mc. Kendry 2002).

Pada proses perlakuan pendahuluan, peluang pengembangan proses yang ada masih terbuka lebar karena beragamnya sumber dan karakteristik bahan lignoselulosa. Pengkajian teknoekonomi terhadap proses perlakuan pendahuluan umumnya mengevaluasi proses asam kuat encer, proses alkali, proses air panas, *steam explosion*, *ammonia fiber explosion* (AFEX), dan *ammonia recycle percolation* (ARP) (Eggeman dan Elander 2005, Hamelinck *et al.* 2005). Namun demikian, tidak berarti proses perlakuan pendahuluan lainnya tidak berpotensi. Dengan semakin gencarnya tuntutan proses yang ramah lingkungan, perlakuan penguapan yang dikombinasikan dengan cara biologis menggunakan jamur pelapuk putih mungkin merupakan salah satu alternatif solusi. Pencarian mikroba, khususnya jamur, yang dapat mendegradasi lignin secara selektif perlu ditingkatkan.

Pada proses hidrolisis, yang menjadi tantangan adalah tersedianya enzim selulase yang lebih murah dan lebih aktif daripada yang dihasilkan *Trichoderma*. Harga enzim selulase yang mencapai USD0,45 per galon etanol masih terlalu

mahal untuk keperluan komersial (DiPardo 2000). Oleh karena itu, berbagai penelitian ditujukan untuk menurunkan biaya enzim. Howard *et al.* (2003) menawarkan pendekatan pemilihan organisme yang menghasilkan enzim yang baru, perbaikan strain organisme yang selama ini digunakan pada skala industri, serta rekayasa enzim, perbaikan produksi dan kondisi faktor-faktor yang berpengaruh terhadap proses hidrolisis, seperti pemilihan substrat, kondisi kultur, daur ulang enzim, dan mendesain kembali proses yang ada.

Pada proses fermentasi, yang perlu dikembangkan adalah khamir yang bersifat toleran terhadap panas dan etanol (*thermo-tolerant and ethanol-tolerant yeast*). Diperlukan pula khamir yang dapat memfermentasi selobiosa serta mikroba yang dapat memfermentasi gula yang berasal dari hemiselulosa, seperti xilosa, arabinosa, galaktosa, dan mannosa.

Cardona dan Sanchez (2007) menyarankan beberapa hal agar produksi etanol dari biomassa lebih efisien, antara lain 1) memanfaatkan atau mencoba memanfaatkan hasil samping, misalnya xilitol, furfural, dan protein sel tunggal dari xilosa atau lignin dari proses delignifikasi, 2) melakukan integrasi beberapa reaksi, misalnya melalui proses *co-fermentation*, sakarifikasi dan fermentasi serentak, sakarifikasi dan fermentasi serentak ditambah *co-fermentation*, dan *consolidated bioprocessing*, 3) melakukan integrasi reaksi dan separasi, misalnya integrasi hidrolisis dan separasi dan pemisahan etanol dari *culture broth*, dan 4) melakukan integrasi proses separasi dan integrasi energi.

KESIMPULAN DAN IMPLIKASI KEBIJAKAN

Penggunaan etanol di Indonesia dan di dunia sebagai bahan bakar akan meningkat karena cadangan minyak bumi yang makin menipis, harga minyak bumi yang cenderung meningkat, berlakunya peraturan reduksi emisi gas rumah kaca, kebijakan penghapusan *methyl tertiary*

buthyl ether (MTBE), serta adanya kecenderungan beralihnya konsumsi pada sumber energi ramah lingkungan dan terbarukan. Potensi perolehan etanol dari ampas tebu yang dihasilkan oleh pabrik gula di Indonesia mencapai 614.827 kL/tahun. Potensi tersebut dapat membantu upaya pemenuhan kebutuhan etanol untuk bahan bakar yang diperkirakan sekitar 1,10 juta kL.

Produksi dan aplikasi bioetanol dari biomassa lignoselulosa, termasuk ampas tebu, masih menghadapi berbagai hambatan dan kendala. Selain masalah teknologi yang belum sepenuhnya dikuasai, harga bioetanol dari biomassa lignoselulosa masih tinggi sehingga sulit bersaing dengan harga bahan bakar minyak yang masih disubsidi pemerintah. Oleh karena itu, pemerintah perlu menerapkan beberapa kebijakan yang dapat mendorong pemanfaatan ampas tebu sebagai bahan baku bioetanol. Pertama, mengintensifkan penelitian dan pengembangan untuk lebih menguasai teknologi konversi biomassa lignoselulosa menjadi etanol, misalnya dengan meningkatkan alokasi dana penelitian melalui Kementerian Negara Riset dan Teknologi atau Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi, Kementerian Pendidikan Nasional. Kedua, memberikan insentif khusus kepada industri gula, terutama industri gula di luar Jawa yang berskala besar, yang berperan dan melakukan integrasi produksi bioetanol dari ampas tebu dengan pabrik gula penghasil ampas tebu. Hal ini akan mengurangi biaya produksi bioetanol karena tidak lagi diperlukan biaya transportasi ampas tebu. Pabrik gula juga dapat membangun sarana dan prasarana yang memfasilitasi pemanfaatan hasil samping pabrik gula berupa ampas tebu dan molasse untuk produksi bioetanol. Ketiga, agar harga bioetanol dapat bersaing dengan harga bahan bakar minyak, diperlukan peran pemerintah, misalnya dengan memberikan subsidi terhadap harga etanol dari bahan lignoselulosa pada tahap awal sampai jangka waktu tertentu dan selanjutnya subsidi dapat dihapus.

DAFTAR PUSTAKA

Anita, S.H., T. Fajriutami, Fitria, R.A. Ermawa, D.H.Y. Yanto, dan E. Hermiati. 2009. *Pre-treatment* bagase menggunakan kultur tunggal dan kultur campuran jamur pelapuk putih *Trametes versicolor* dan *Pleurotus ostreatus*.

hlm. 137–144. Prosiding Seminar Nasional Biomass Utilization for Alternative Energy and Chemicals, Bandung, 23 April 2009. Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Parahyangan, Bandung.

Badger, P.C. 2002. Ethanol from cellulose: A general review. p. 17–21. In J. Janick and A. Whipkey (Ed.). Trends in New Crops and New Uses. ASHS Press, Alexandria, VA.

- Cardona, C.A. and O.J. Sanchez. 2007. Fuel ethanol production: Process design trends and integration opportunities. *Bioresour. Technol.* 98: 2415–2457.
- Chandel, A.K., R.K. Kapoor, A. Singh, and R.C. Kuhad. 2007. Detoxification of sugarcane bagasse hydrolysate improves ethanol production by *Candida shehatae* NCIM 3501. *Bioresour. Technol.* 98: 1947–1950.
- Costello, R. and H. Chum. 1998. Biomass, bioenergy and carbon management. p. 11–17. *In* D. Wichert (Ed.). *Bioenergy '98: Expanding Bioenergy Partnerships*. Omni Press, Madison.
- Demirbas, A. 2005. Bioethanol from cellulosic materials: A renewable motor fuel from biomass. *Energy Sour.* 27: 327–337.
- DiPardo, J. 2000. Outlook for biomass ethanol production and demand. <http://www.eia.doe.gov/oiaf/analysispaper/biomass.html>. [20 February 2005].
- Direktorat Jenderal Perkebunan. 2009a. Luas areal dan produksi perkebunan seluruh Indonesia menurut pengusahaan. <http://ditjenbun.deptan.go.id/cigraph/index.php/viewstat/komoditutama/9-tebu>. [28 Februari 2010].
- Direktorat Jenderal Perkebunan. 2009b. Road Map Swasembada Gula Nasional. http://ditjenbun.deptan.go.id/index.php?option=com_content&view=article&id=72:akselerasi-tebu&catid=43:akselerasi-tebu&Itemid=44. [28 Februari 2010].
- Duff, S.J.B. and W.D. Murray. 1996. Bioconversion of forest products industry waste cellulose to fuel ethanol: A review. *Bioresour. Technol.* 55: 1–33.
- Eggeman, T. and R.T. Elander. 2005. Process and economic analysis of pretreatment technologies. *Bioresour. Technol.* 96: 2019–2025.
- Elisashvili, V., M. Penninckx, E. Kachlishvili, N. Tsiklauri, E. Metreveli, T. Kharziani, and G. Kvesitadze. 2008. *Lentinus edodes* and *Pleurotus* species lignocellulolytic enzymes activity in submerged and solid-state fermentation of lignocellulosic wastes of different composition. *Bioresour. Technol.* 99: 457–462.
- Ermawar, R.A., D.H.Y. Yanto, Fitria, and E. Hermiati. 2006. Biodegradation of lignin in rice straw pretreated by white-rot fungi. *Widya Riset* 9(3): 197–202.
- Fengel, D. and G. Wegener. 1984. *Wood: Chemistry, ultrastructure, reactions*. Walter de Gruyter & Co., Berlin.
- Fujita, M. and H. Harada. 1991. Ultrastructure and formation of wood cell wall. p. 3–57. *In* D.N.S. Hon and N. Shiraishi (Ed.). *Wood and Cellulosic Chemistry*. Marcel Dekker, Inc., New York.
- Gregg, D. and J.N. Saddler. 1995. Bioconversion of lignocellulosic residue to ethanol: Process flowsheet development. *Biomass and Bioenergy* 9(1–5): 287–302.
- Grohmann, K. 1993. Simultaneous saccharification and fermentation of cellulosic substrates to ethanol. p. 183–209. *In* J.N. Saddler (Ed.). *Bioconversion of Forest and Agricultural Plant Residues*. CAB International, Wallingford.
- Hahn-Hagerdal, B., J. Hallborn, H. Jeppsson, L. Olsson, K. Skoog, and M. Walfridsson. 1993. Pentose fermentation to alcohol. p. 231–290. *In* J.N. Saddler (Ed.). *Bioconversion of Forest and Agricultural Plant Residues*. CAB International, Wallingford.
- Hahn-Hagerdal, B., M. Galbe, M.F. Gorwa-Grauslund, G. Liden, and G. Zacchi. 2006. Bioethanol – the fuel of tomorrow from the residues of today. *Trends in Biotechnol.* 24(12): 549–556.
- Hambali, E., S. Mujdalipah, A.H. Tambunan, A.W. Pattiwiri, dan R. Hendroko. 2007. *Teknologi Bioenergi*. Agromedia Pustaka, Jakarta.
- Hamelinck, C.N., G. van Hooijdonk, and A.P.C. Faaij. 2005. Ethanol from lignocellulosic biomass: Techno-economic performance in short-, middle- and long-term. *Biomass and Bioenergy* 28: 384–410.
- Hatakeyama, S. and M. Kuwahara. 2004. Degradation of discharged stump and root of Japanese cedar by wood rotting Basidiomycetes. p. 373. *In* T. Umezawa, K. Baba, T. Hata, T. Hattori, Y. Honda, Y. Imamura, T. Mori, H. Sorimachi, J. Sugiyama, K. Umemura, H. Yano, T. Yoshimura, and M. Yuki (Ed.). *Sustainable Production and Effective Utilization of Tropical Forest Resources*. Proceedings of the 5th International Wood Science Symposium, Kyoto, 17–19 September 2004. Research Institute for Sustainable Humanosphere, Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia, Japan Society for the Promotion of Science, Kyoto.
- Hayn, M., W. Steiner, R. Klinger, H. Steinmüller, M. Sinner, and H. Esterbauer. 1993. Basic research and pilot studies on the enzymatic conversion of lignocellulose. p. 33–72. *In* J.N. Saddler (Ed.). *Bioconversion of Forest and Agricultural Plant Residues*. CAB International, Wallingford.
- Holtzapfel, M.T., R.R. Davison, L.L. Lowery Jr, and C.B. Granda. 2004. *Methods and Systems for Pretreatment and Processing of Biomass* (US Pat. No. 2004/0168960 A1).
- Howard, R.L., E. Abotsi, J.E.L. van Rensburg, and S. Howard. 2003. Lignocellulose biotechnology: Issues of bioconversion and enzyme production. *Afr. J. Biotechnol.* 2(12): 602–619.
- Hu, Z. and Z. Wen. 2008. Enhancing enzymatic digestibility of switchgrass by microwave-assisted alkali pretreatment. *Biochem. Engin. J.* 38(3): 369–378.
- Itoh, H., M. Wada, Y. Honda, M. Kuwahara, and T. Watanabe. 2003. Bioorganosolve pretreatments for simultaneous saccharification and fermentation of beech wood by ethanolysis and white rot fungi. *J. Biotechnol.* 103: 273–280.
- Kaar, W.E., C.V. Gutierrez, and C.M. Kinoshita. 1998. Steam explosion of sugarcane bagasse for conversion to ethanol. *Biomass and Bioenergy* 14(3): 277–287.
- Keshwani, D.R. 2009. *Microwave Pretreatment of Switchgrass for Bioethanol Production*. Dissertation. Graduate Faculty of North Carolina State University, Raleigh, North Carolina. 219 pp.
- Kitchaiya, P., P. Intanakul, and M. Krairiksh. 2003. Enhancement of enzymatic hydrolysis of lignocellulosic wastes by microwave pretreatment under atmospheric pressure. *J. Wood Chem. Technol.* 23(2): 217–225.
- Kompas. 2005. Emisi karbon gasohol lebih rendah dibanding pertamax. *Kompas* 15 Februari 2005. hlm. 10.
- Krishna, S.H. and G.V. Chowdary. 2000. Optimization of simultaneous saccharification and fermentation for the production of ethanol from lignocellulosic biomass. *J. Agric. Food Chem.* 48: 1971–1976.
- Laser, M., D. Schulman, S.G. Allen, J. Lichwa, M.J. Antal, and L.R. Lynd. 2002. A comparison of liquid hot water and steam pretreatments of sugarcane bagasse for bioconversion to ethanol. *Bioresour. Technol.* 81: 33–44.
- Lee, J.W. 2007. Biological pretreatment of softwood *Pinus densiflora* by three white rot fungi. *J. Microbiol.* 45(6): 485–491.
- Licht, F.O. 2009. World ethanol production growth to hit five-year low. *World Ethanol and Biofuels Rep.* 7(18): 365.
- Litzen, D., D. Dixon, P. Gilcrease, and R. Winter. 2006. *Pretreatment of Biomass for Ethanol Production*. (US Pat. No. 2006/0141584 A1).
- Lobos, S., M. Tello, R. Polanco, L.F. Larrondo, A. Manubens, L. Salas, and R. Vicuna. 2001. Enzymology and molecular genetics of the ligninolytic system of the basidiomycete *Ceriporiopsis subvermispora*. *Curr. Sci.* 81(8): 992–997.
- Magara, K., J. Azuma, and T. Koshijima. 1989. Microwave-irradiation of lignocellulosic materials X: Conversion of microwave-irradiated agricultural wastes into ethanol. *Wood Res.* 76: 1–9.
- Mc. Kendry, P. 2002. Energy production from biomass (part 1): Overview of biomass. *Bioresour. Technol.* 83: 37–46.
- Mc. Millan, J.D. 1993. *Xylose Fermentation to Ethanol: A Review*. National Renewable Energy Laboratory, Golden, Colorado. p. 3.
- Mosier, N., C. Wyman, B. Dale, R. Elander, Y. Lee, M. Holtzapfel, and M. Ladisch. 2005. Features of promising technologies for pretreatment of lignocellulosic biomass. *Bioresour. Technol.* 96: 673–686.

- Nguyen, Q.A. 1993. Economic analyses of integrating a biomass-to-ethanol plant into a pulp/saw mill. p. 321–340. In J.N. Saddler (Ed.). *Bioconversion of Forest and Agricultural Plant Residues*. CAB International, Wallingford.
- Ohgren, K., R. Bura, G. Lesnicki, J. Saddler, and G. Zacchi. 2007a. A comparison between simultaneous saccharification and fermentation and separate hydrolysis and fermentation using steam-pretreated corn stover. *Proc. Biochem.* 42: 834–839.
- Ohgren, K., R. Bura, J. Saddler, and G. Zacchi. 2007b. Effect of hemicellulose and lignin removal on enzymatic hydrolysis of steam pretreated corn stover. *Bioresour. Technol.* 98: 2503–2510.
- Ooshima, H., K. Aso, Y. Harano, and T. Yamamoto. 1984. Microwave treatment of cellulosic materials for their enzymatic hydrolysis. *Biotechnol. Lett.* 6(5): 289–294.
- Palmarola-Adrados, B., M. Galbe, and G. Zacchi. 2005. Pretreatment of barley husk for bioethanol production. *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 80: 85–91.
- Pandey, A., C.R. Soccol, P. Nigam, and V.T. Soccol. 2000. Biotechnological potential of agro-industrial residues. I: Sugarcane bagasse. *Bioresour. Technol.* 74: 69–80.
- P3GI. 2010. Laporan Produksi Giling Tahun 2009 PTPN/PT Gula di Indonesia. Pusat Penelitian Perkebunan Gula Indonesia (P3GI), Pasuruan.
- Saha, B.C., L.B. Iten, M.A. Cotta, and Y.V. Wu. 2005. Dilute acid pretreatment, enzymatic saccharification, and fermentation of rice hulls to ethanol. *Biotechnol. Progr.* 21: 816–822.
- Samsuri, M., B. Prasetya, E. Hermiati, T. Idiyanti, K. Okano, Syafwina, Y. Honda, and T. Watanabe. 2004. Effects of fungal treatments on ethanol production from bagasse by simultaneous saccharification and fermentation. p. 317–323. In T. Umezawa, K. Baba, T. Hata, T. Hattori, Y. Honda, Y. Imamura, T. Mori, H. Sorimachi, J. Sugiyama, K. Umemura, H. Yano, T. Yoshimura, and M. Yuki. (Ed.). *Sustainable Production and Effective Utilization of Tropical Forest Resources*. Proceedings of the 5th International Wood Science Symposium; Kyoto, 17–19 September 2004. Research Institute for Sustainable Humanosphere, Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia, Japan Society for the Promotion of Science, Kyoto.
- Samsuri, M., B. Prasetya, E. Hermiati, T. Idiyanti, K. Okano, Syafwina, Y. Honda, and T. Watanabe. 2005. Pretreatments for ethanol production from bagasse by simultaneous saccharification and fermentation. p. 288–294. In W. Dwianto (Ed.). *Towards Ecology and Economy Harmonization of Tropical Forest Resources*. Proceedings of the 6th International Wood Science Symposium, Bali, 29–31 August 2005. Research Institute for Sustainable Humanosphere, Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia, Japan Society for the Promotion of Science, Kyoto.
- Samsuri, M., M. Gozan, R. Mardias, M. Baiquni, H. Hermansyah, A. Wijanarko, B. Prasetya, dan M. Nasikin. 2007. Pemanfaatan selulosa bagas untuk produksi etanol melalui sakarifikasi dan fermentasi serentak dengan enzim xylanase. *Makara Teknologi* 11(1): 17–24.
- Sasaki, M., T. Adschiri, and K. Arai. 2003. Fractionation of sugarcane bagasse by hydrothermal treatment. *Bioresour. Technol.* 86: 301–304.
- Sun, Y. and J. Cheng. 2002. Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: A review. *Bioresour. Technol.* 83: 1–11.
- Sun, Y. and J. Cheng. 2005. Dilute acid pretreatment of rye straw and bermuda grass for ethanol production. *Bioresour. Technol.* 96: 1599–1606.
- Suryawati, L., M.R. Wilkins, D.D. Bellmer, R.L. Huhnke, N.O. Maness, and I.M. Banat. 2009. Effect of hydrothermolysis process conditions on pretreated switchgrass composition and ethanol yield by SSF with *Kluyveromyces marxianus* IMB4. *Proc. Biochem.* 44: 540–545.
- Syafwina, E.D. Wong, Y. Honda, T. Watanabe, and M. Kuwahara. 2002a. Pretreatment of empty fruit bunch of oil palm by white-rot fungi for the utilization of its component. p. 351–356. In W. Dwianto, S. Yusuf, E. Hermiati, and L. Suryanegara. (Ed.). *Sustainable Utilization of Tropical Forest Resources*. Proceedings of the 4th International Wood Science Symposium, Serpong, 2–5 September 2002. Research Institute for Sustainable Humanosphere, Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia, Japan Society for the Promotion of Science, Serpong.
- Syafwina, Y. Honda, T. Watanabe, and M. Kuwahara. 2002b. Pretreatment of oil palm empty fruit bunch by white-rot fungi for enzymatic saccharification. *Wood Res.* 89: 19–20.
- Syafwina, T. Watanabe, Y. Honda, M. Kuwahara, and T. Watanabe. 2004. Simultaneous saccharification and fermentation of oil palm empty fruit bunch pretreated by white rot fungi for ethanol production. p. 313–316. In T. Umezawa, K. Baba, T. Hata, T. Hattori, Y. Honda, Y. Imamura, T. Mori, H. Sorimachi, J. Sugiyama, K. Umemura, H. Yano, T. Yoshimura, and M. Yuki. (Ed.). *Sustainable Production and Effective Utilization of Tropical Forest Resources*. Proceedings of the 5th International Wood Science Symposium, Kyoto, 17–19 September 2004. Research Institute for Sustainable Humanosphere, Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia, Japan Society for the Promotion of Science, Kyoto.
- Tanabe, T., Y. Baba, N. Shinohara, T. Mitani, Y. Honda, and T. Watanabe. 2004. Pretreatments of softwood by microwave irradiation and white rot fungi for ethanol production. p. 379. In T. Umezawa, K. Baba, T. Hata, T. Hattori, Y. Honda, Y. Imamura, T. Mori, H. Sorimachi, J. Sugiyama, K. Umemura, H. Yano, T. Yoshimura, and M. Yuki. (Ed.). *Sustainable Production and Effective Utilization of Tropical Forest Resources*. Proceedings of the 5th International Wood Science Symposium, Kyoto, 17–19 September 2004. Research Institute for Sustainable Humanosphere, Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia, Japan Society for the Promotion of Science, Kyoto.
- Thompson, V.S., D.N. Thompson, K.D. Schaller, and W.A. Apel. 2007. Enzyme and Methodology for the Treatment of a Biomass. (US Pat. No. 2007/0099282 A1).
- Viikari, L., M. Tenkanen, J. Buchert, M. Ratto, M. Bailey, M. Siikaaho, and M. Linko. 1993. Hemicellulases for industrial applications. p. 131–182. In J.N. Saddler (Ed.). *Bioconversion of Forest and Agricultural Plant Residues*. CAB International, Wallingford.
- Wuyep, P.A., A.U. Khan, and A.J. Nok. 2003. Production and regulation of lignin degrading enzymes from *Lentinus squarrosulus* (Mont.) Singer and *Psathyrella atrotrubonata* Pegler. *Afr. J. Biotechnol.* 2(11): 444–447.
- Wyman, C.E., B.E. Dale, R.T. Elander, M. Holtzaple, M.R. Ladisch, and Y.Y. Lee. 2005. Coordinated development of leading biomass pretreatment technologies. *Bioresour. Technol.* 96(18): 1959–1966.